

弥生時代水田土に残る稲の根跡に関する研究

－池島・福万寺遺跡における X 線立体造影法の適用例－

徳永光一¹⁾・佐々木長市²⁾・佐藤幸一³⁾・佐瀬 隆⁴⁾・加藤芳朗⁵⁾・工楽善通⁶⁾・井上智博⁷⁾

1. はじめに

植物が過去に地中に根を張って生育した場合、やがてその植物が枯死し、根も腐朽して、地中に生じる空洞すなわち根跡、根穴などと呼ばれるもののうち、直径が2～3 mm 以下の細いもの、これを「根成孔隙」という。

この根成孔隙が変形、消滅せずに、地層中に保存される耐久年月について、その地層の堆積年代に基づく計算から、20～40 万年以上であることが、当研究の研究者らにより明らかにされてきた(徳永ら, 1997)。地層に対する攪乱作用がない限り、極めて長期に安泰であることが、根成孔隙の特性である。しかし反対に、自然や人間の営為が地層に物理的攪乱を与えると、簡単に変形や消滅すること、根成孔隙の特性である。

これら二つの特性を活用すれば、農耕遺跡に関する考古学的課題や古環境の新しい研究手法として、「根成孔隙の X 線立体造影法」が有効な手段となる可能性が考えられてきた(徳永, 1999)。この可能性を実証するため、大阪府東大阪市池島町にある池島・福万寺遺跡(以下、当遺跡)の弥生時代水田土層を対象として調査を進めた。弥生時代水田の作土やその下層土に水稻根が作る根成孔隙を X 線造影して検討を行った。因みに、この X 線立体造影法は、我国以外ではまだ普及が進んでいない新手法である。

根成孔隙の造影写真には、各種植物の根系により作られたものが混在する。それらの分別などを写

¹⁾ 岩手大学名誉教授：〒 020-0116 岩手県盛岡市箱清水 1-39-16

³⁾ 弘前大学農学生命科学部：〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3

²⁾ 北里大学獣医畜産学部：〒 034-8628 青森県十和田市東二十三番町 35-1

⁴⁾ 岩手県立宮古高等学校：〒 027-0052 岩手県宮古市宮町 2-1-1

⁵⁾ 静岡大学名誉教授：〒 438-0077 静岡県磐田市国府台 53-4

⁶⁾ 大阪府立狭山池博物館長：〒 589-0007 大阪府大阪狭山市池尻中 2 丁目

⁷⁾ (財)大阪府文化財センター 京阪支所：〒 572-0814 大阪府寝屋川市堀溝 1-1-15

キーワード：根成孔隙 (pore system formed by roots), 根跡 (traces of roots growth),

古代水田の代かき (puddling in ancient paddy), 植物珪酸体 (opal phytolith),

土壌間隙の X 線立体造影法 (soil void imaging method using contrast medium and X-ray stereography)

真像からだけ行うには、研究の蓄積が不足である。そこで、根成孔隙の研究では常に行ってきた植物珪酸体分析（以下、OP 分析）を今回も並行して、その結果を照合しながら総合検討を行った。

また、当遺跡と地形、土性などの類似した現代水田についても、その作土や下層土の水稲根跡を、同じ X 線造影法で撮影することにした。この影像と当遺跡の影像を対比することで、弥生時代中期中葉（約 2,100 年前）と同時代前期末～中期初頭（約 2,200 年前）における、当遺跡の稲作に関わる幾つかの知見を得ることとした。また、当遺跡に点在する島畠（第 3 - 3 面、15 世紀）についても調査を並行した。

なお、「根成孔隙」の用語を「根跡」に切替えて、以下の記述では用いる。根成孔隙とは土壌物理学的に土壌間隙の種別名称として、またこの間隙が有する組織的、機能的特性も意味する専門用語として定められたものである。しかし、本研究においては、土壌物理学的意義よりも、水稲根や水稲栽培に関わる考古学的検討が主題であり、根跡の用語の方が、目的に沿った表現と考えられたため、これを用いることとした。また、本稿の文章で「間隙」とは土中の固相以外の空間を総称するものとして用い、「孔隙」とは毛管状形態の間隙に限定して用いる。根跡、虫穴などが孔隙に属する。

2. 調査、採土

1) 現代水田

現代の水田のサンプルとして、地形、土性が当遺跡に類似していること以外に、栽培法が明確な 2 ヶ所の水田を選んだ。一つは、現代水田 I として、盛岡市郊外の北上川河岸（紫波町 K 地区）の個人農民の沖積低平地水田を調査した。土性は作土から下層まで、シルト質粘土であった。この水田では、春に耕起、代かきを行う普通移植栽培が毎年行われてきた。荒起し前の 4 月初めに、調査、採土した。地下水位は 50~60cm であり、深さ 50cm まで掘削して、作土層（15~20cm 厚）、犁床層（作土直下の約 10cm 厚）及び下層の観察を行った。犁床以下は青灰色化した還元層であった。断面観察後、直ちに作土と犁床層から不攪乱ブロック採土を行った。採土法の詳細は徳永の方法（徳永、1995）によった。

現代水田 II としては、弘前大学付属生物共生教育研究センターの金木（カナギ）農場（北津軽郡金木町）の 1 水田を選んだ。岩木川支流沿いの低湿地水田で、土性はやはり粘土質である。この水田は不耕起栽培を 1 年行った時点のものを調査した。耕起と代かきをせず、不耕起田植機で田植をし、1 作の収穫を行った翌年 4 月に採土をした。不耕起の前年までは、毎年普通移植栽培が行われてきた。採土は、田面掘削調査後、直ちに行われた。作土厚は約 15cm、直下の犁床は約 10cm 厚で、犁床層および下層は還元層であった。

2) 池島地区水田

当遺跡は恩智川を挟んで、東側の池島地区と西側の福万寺地区に二分されるが、調査と採土を行っ

たのは池島地区の水田と島畠である。図1にその位置を黒丸で示す。1～3が弥生時代水田，4は島畠の調査，採土位置である。更に，調査断面とその断面からの採土層位を，図2に示した。

最初に，これら図2の断面記載法について，概説する。「硬(h) 軟(s)」は，土層の垂直面を指やボールペンの尻で押した時の凹み方によって判断する。作土では凹みが鮮明な（軟かい）傾向がある。

「縦根跡」については，すでに，加藤(1992)の発表がある。発掘現場でよく使われるケズリ鎌ではうまく観察できない。断面から土塊を取出し，垂直に割ると管状孔隙（多くは直線状，ときに屈曲）として，また，水平に割ると微細な円孔として現れる。太さは径1 mm 以下のことが多い。現場ではその量を++，+，±で表現するが，水平面での一定面積当りの円孔数（密度）とは，図3のような正相関が得られている。++が70，+が50，±が20 個/100cm²辺りに対応する。なお，これが総て稲の根跡である確証は無いが，現代水田の作土や下層土に類似の孔隙が観察されることを根拠とする。これをさらに，X線造影で明らかになる根跡の実体と対比するのが，この研究の課題の一つでもある。

「 α - α' ジピリジール」は，同名の有機物のサク酸溶液（無色）を土層面に滴下した時に，赤変する程度を++，+，±で表示した。これは第一鉄（還元状態の Fe）の検出に活用される。

「炭酸鉄」（断面3）は，炭酸第一鉄（FeCO₃）の斑紋や結核である（加藤，1992）。

また，「採土法」は図2に示したステンレス製の採土杵に，木板をあてがって，目標層位に静かに押入れ，ナイフにより杵ごと方形土塊（ブロック）を切出す不攪乱採土を行った。

さて，断面1には弥生時代の3期の水田土層が現れている。斜線で示した1黒，2黒，3黒が弥生時代水田の作土であることが，これまでの調査で明らかにされている。1黒とは第1 黑色粘土層の略

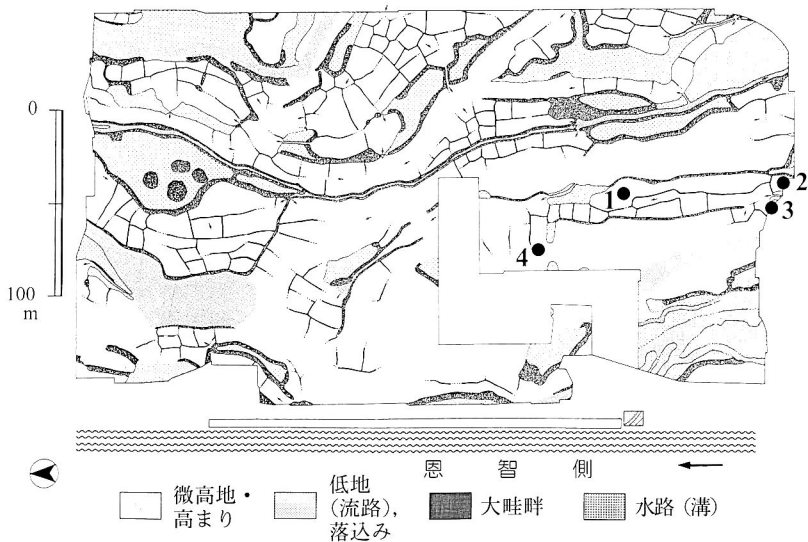


図1 池島遺跡における調査・採土の位置（黒丸4ヶ所）[地図は岡本，2002より]

Fig.1 The location of soil survey and sampling points (4 points) in IKEJIMA site

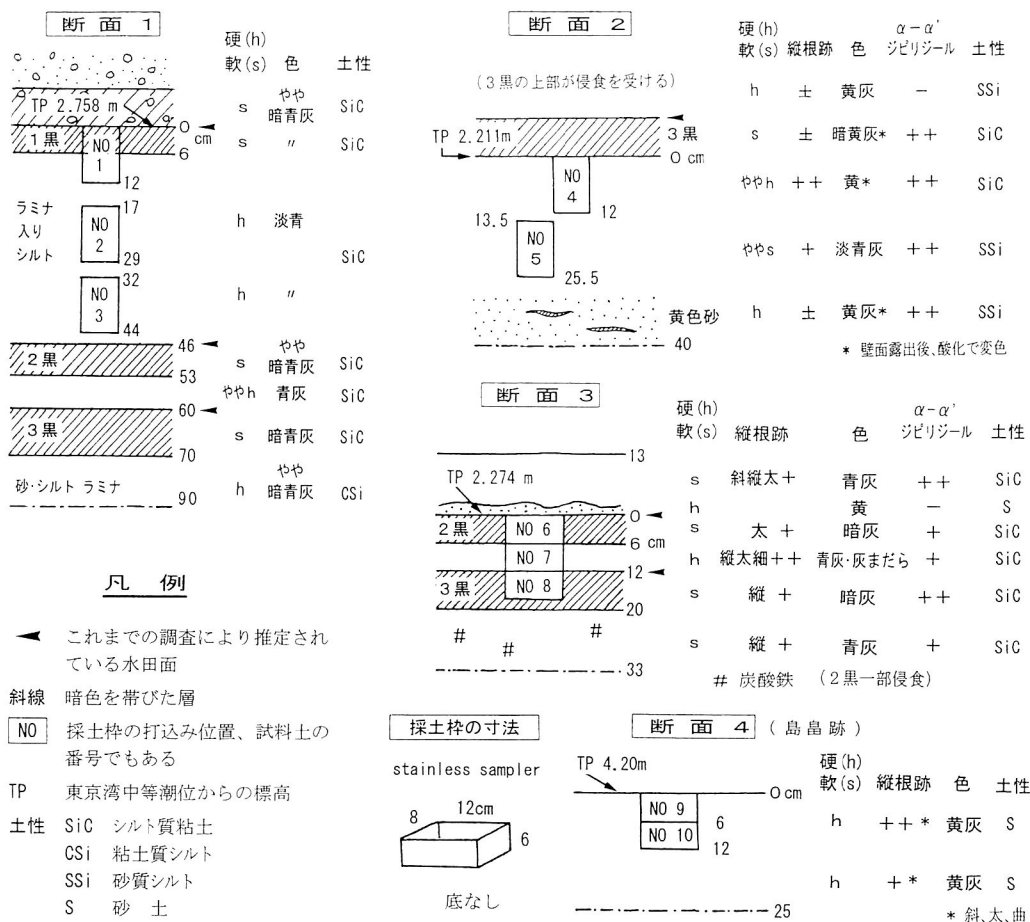


図2 調査断面と採土層位

Fig.2 The soil profiles surveyed and the sampling horizons

称(以下、2黒、3黒も同じ)で、やや黒味のある暗灰色粘土層である。1黒を作土とした水田を、1黒水田と呼ぶことにする(2黒、3黒も同じ)。1黒水田の時期は、弥生時代後期(約1,800年前)、2黒水田は弥生時代中期、3黒水田は弥生時代前期末～中期初頭(約2,200年前)である。2黒水田については、福万寺I期地区の北東部から池島I期地区にかけて、2黒層が砂・シルトを挟んで2層に細分されることが明らかにされている。2黒(古)の水田は弥生時代中期中葉(約2,100年前)、2黒(新)は弥生時代中期後葉(約2,000年前)である。今回調査した地点では、2黒(古)層の上面で水田跡が検出されたので、この層を採土した。これらの土層とその年代、各年代における水田開発などについては井上ら(井上他11名, 2002)に詳しい。なお、断面4・鳥島の採土面の時代は15世紀である。

断面1からは、NO1、2、3ブロックの採土を行ったが、後述するように、この断面では既に土が乾燥しており、根跡のX線造影が不可能となった。そこで、新に採土地点2、3で断面露出の掘削と調査・採土を同時に行い、乾燥していない試料土を得た。だが、これらの地点では断面2、3に

示すように1黒層はすでに欠落しており、2黒水田、3黒水田の調査・実験が本研究の中心になった。

3. 実験方法

1) 植物珪酸体(OP)分析法

2黒、2黒直下、3黒、3黒直下、島島表層の5試料について植物珪酸体分析を実施した。分析の手順は以下の通りである。

(1) 乾土1g前後を秤量。(2) 5%過酸化水素を加えホットプレート上で加熱し有機物分解。

(3) 超音波処理で土塊の破碎。(4) ジチオナイ

ト法により脱鉄処理。(5) デカンテーションと篩で粒径5~100 μ m画分を分離、乾燥、秤量。(6) 分離画分の一部をカナダバルサムで封じ、プレパラートを作製、検鏡、同定。

(植物珪酸体の区分)

検出された植物珪酸体は、給源植物、給源組織・細胞、形態により、ファン型(イネ科機動細胞起源)、棒状型(主にイネ科長細胞起源)、ポイント型(イネ科棘細胞起源)、タケ型(イネ科タケ亜科短細胞起源)、ヒゲシバ型(イネ科スズメガヤ亜科、一部のキビ亜科、一部のダンチク亜科短細胞起源)、キビ型(イネ科キビ亜科短細胞起源)、イネ型(イネ科イネ属短細胞起源)、ウシノケグサ型(イネ科イチゴツナギ亜科短細胞起源)、樹木起源、カヤツリグサ科起源などの珪酸体群に区分した。

2) X線立体造影法

採土枠から押出した方形土塊を6個に切断し、夫々を4cm立方の標本試料に整形して、X線撮影に供する。整形時の切りくず土はOP分析試料として用い、X線根跡像と植物珪酸体を一体で検討できるようにした。標本試料は撮影まで、水で飽和した砂を入れた砂箱中の、砂面上に置き、密閉蓋をして保存した。

4cm立方の標本は、撮影前日から準備を始め、まず粘土薄層で5面(上面を除く)をコーティングする。次に、真空中で標本内の脱気を行い、静かに上面から注水して、標本を完全に飽和させる。徐々に真空を解除し、大気圧中に出したら、標本の上面に、開発した土壌用造影剤(液体)を混ぜ、卓上で放置し、標本の5面から水分を乾燥させる。乾燥に伴い、蒸発した水が入っていた標本内間隙へと、水の代わりに造影剤が引き込まれる。根跡など大きく、太い間隙から脱水と浸剤が進行する。

乾燥(浸剤)の進行と共に、X線撮影を行う。撮影はステレオ効果をねらって、同一標本を左右にずらして2回行い、2枚1組の写真を得て、「立体視」を行う方法である。

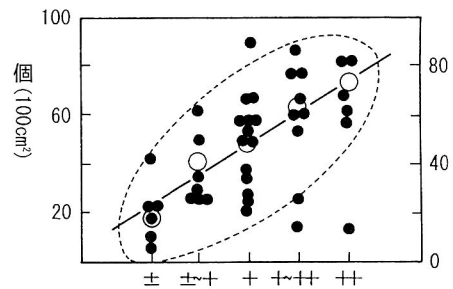


図3 縦根跡の定性的判定(横軸)と密度(個/100cm²)との相関 [白丸は平均値]

Fig.3 The correlation found in the qualitative estimations (lateral axis) to roots density (pore pieces/100cm²) with regard to vertical traces of roots growth [white circle shows the mean]

これらの詳細は、徳永（1995）の方法により行った。なお、この撮影標本の大きさは、今のところ 4 cm 立方が標準であるが、同一原理で 4 ～ 5 倍増まで拡大は可能である。

4. 結果と考察

1) 植物珪酸体分析結果について

得られた各試料の植物珪酸体組成に基づき、組成図（図 4）を作成した。また、検出された主なる植物珪酸体の姿を、写真 1 に示した。

（1）2 黒

ファン型（イネ科機動細胞起源）では、非タケ亜科起源が優勢である。その中でイネ属タイプの検出率は約 5 % であった。イネ科短細胞起源ではキビ型が約 14 % で最も優勢であり、続いて、ヒゲシバ型（ヨシ属タイプ）が約 7 %、タケ型メダケ属タイプが約 5 %、ウシノケグサ型が 2 % 強、イネ型が 2 % 弱検出された。また、タワー状が約 6 %、糸巻き状が約 2 % 検出された。非イネ科起源では樹木起源（広葉樹）、カヤツリグサ科起源（種皮起源）がともに約 1 % 検出されたに過ぎない。

（2）2 黒直下

ファン型では、非タケ亜科起源が優勢であり、その中でイネ属タイプの検出率は約 3 % であった。短細胞起源ではキビ型が最も多く約 16 % 検出され、その中で典型が優勢であったが、フリル付きも 4 % 弱検出された。続いて、タケ型メダケ属タイプ、ヒゲシバ型（ヨシ属タイプ）が共に約 6 %、ウシノケグサ型が約 3 %、イネ型が約 2 % 検出された。他にタワー状が約 3 %、糸巻き状が約 2 % 検出された。非イネ科起源では、樹木起源（広葉樹）が約 1 % 検出されるに止まるが、カヤツリグサ科（種皮起源）は約 3 % 検出された。

（3）3 黒

ファン型では、非タケ亜科起源が優勢であり、その中でイネ属タイプ、ヨシ属タイプがともに約 1 % 検出された。短細胞起源ではキビ型が約 13 % で最も多く検出され、次いでヒゲシバ型（ヨシ属タイプ）約 8 %、ウシノケグサ型約 6 %、タケ型メダケ属タイプ約 5 % が続き、イネ型の検出率は 1 % 弱であった。他にタワー状が約 5 %、糸巻き状が約 2 % 検出される。非イネ科起源では、樹木起源（広葉樹）、カヤツリグサ科（種皮起源）が検出されが、いずれも 1 % に満たない。

（4）3 黒直下

ファン型では非タケ亜科起源が優勢であり、その中でヨシ属タイプが約 2 % 検出された。イネ属タイプは検出されない。タケ亜科起源は分析試料中で最も多いが、それでもその検出率は 6 % に満たない。短細胞起源ではタケ型メダケ属が最も多く約 9 % 検出された。これに、キビ型約 7 %、ヒゲシバ型（ヨシ属タイプ）約 2 % が続き、イネ型は 1 % 弱検出された。その他、糸巻き状が約 5 %、タワー状が約 2 % 検出される。非イネ科起源は検出されない。

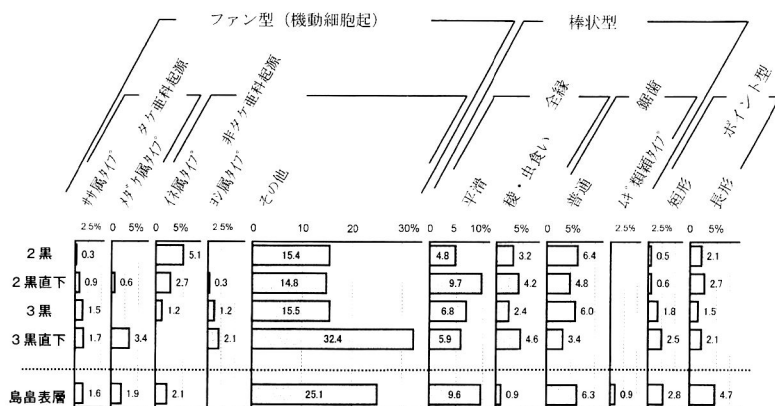


図 4a 植物珪酸体組成図 (1)
Fig.4a Opal phytolith diagram (1)

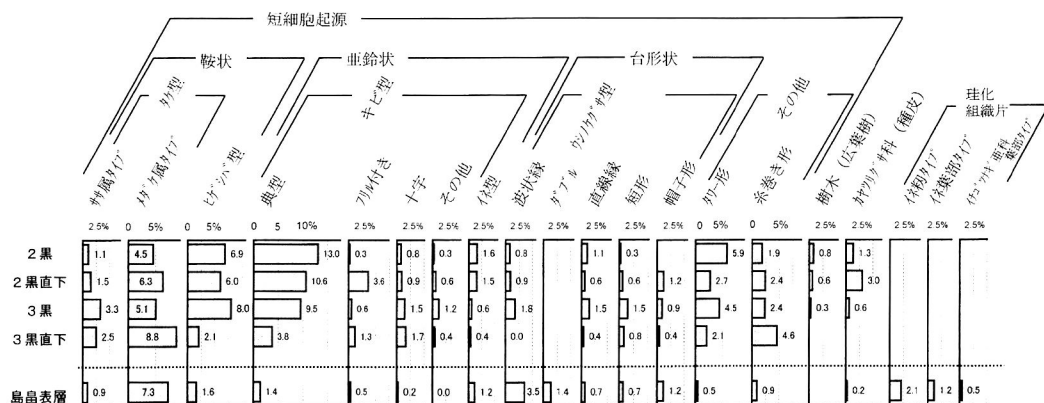


図 4b 植物珪酸体組成図 (2)
Fig.4b Opal phytolith diagram (2)

(5) 島島表層

ファン型では非タケ亜科起源が優勢であり、その中でイネ属タイプが約 2 % 検出された。短細胞起源ではタケ型メダケ属タイプが約 7 %, ウシノケグサ型が約 8 % 検出された。ウシノケグサ型にはダブルタイプの珪酸体も含まれる。カビ型の検出率は約 2 % にとどまり、イネ型は 1 % 強検出された。2 黒水田土層などと異なりイネ類タイプ、イネ葉部タイプ、イチゴツナギ亜科葉部タイプの珪化組織片やムギ類タイプの棒状型珪酸体が検出された。

以上にまとめた珪酸体組成の特徴から、弥生時代水田土層については、2 黒, 2 黒直下, 3 黒ではカビ亜科, イネ属, ヨシ属を主とする非タケ亜科が珪酸体の主要な給源と推定される。それに対し、3 黒直下では非タケ亜科を主要給源とするものの、上位 3 層におけるより、タケ亜科の関わりが比較的大きかったと考えられる。イネ属タイプの珪酸体は、何れの試料でも検出されたが、2 黒, 2 黒直下でより大きな検出率を得た。イネ属タイプ珪酸体のこのような検出傾向は、外山 (1998) において

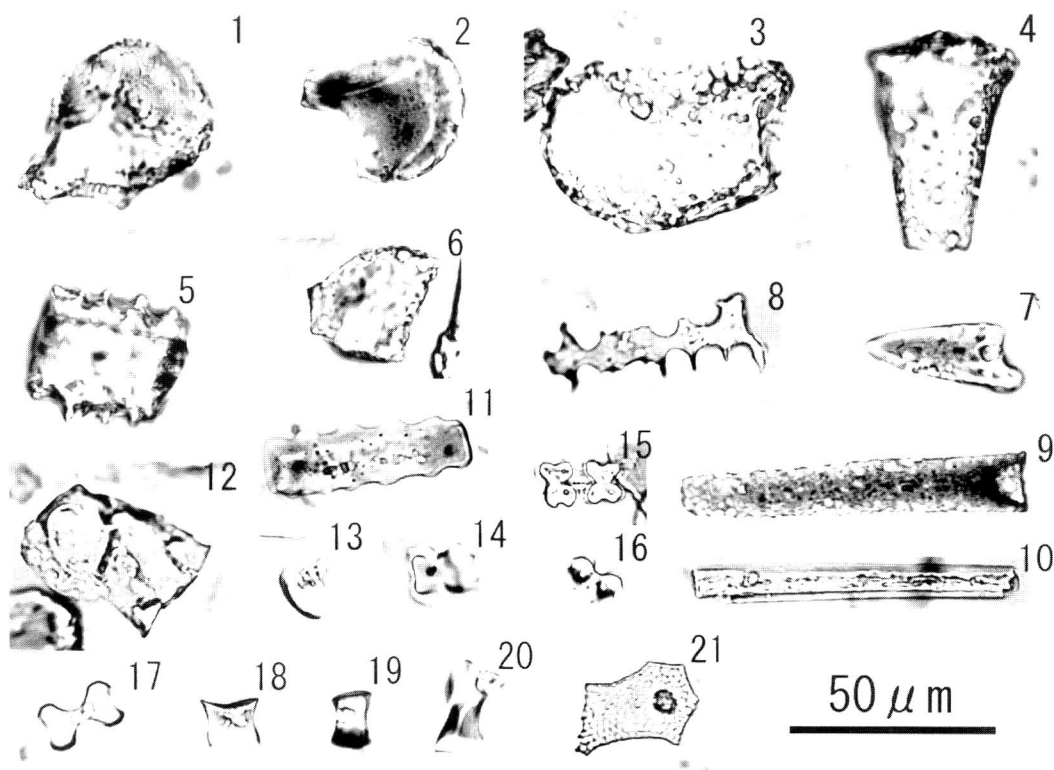


写真1 検出された主な植物珪酸体

1-2: ファン型 (イネ属タイプ), 3: ファン型 (ヨシ属タイプ), 4: ファン型 (非タケ亜科タイプ), 5: ファン型 (メダケ属タイプ), 6: ファン型 (ササ属タイプ), 7: ホイント型 (長形), 8: 棒状型 (ムギ類穎タイプ), 9: 棒状型 (全縁タイプ), 10: 棒状型 (稜・虫食い穴), 11: ウシノケグサ型 (ダブル), 12: イネ籾珪化組織片, 13: ヒゲシバ型 (ヨシ属タイプ), 14: キビ型 (フリル付き), 15: イネ葉部組織片, 16: イネ型, 17: キビ型 (典型), 18: その他短細胞起源 (タワー形), 19: タケ型 (メダケ属タイプ), 20: タケ型 (ササ属タイプ), 21: スゲ種皮起源

1・2・7: 2黒下層, 13・14・16・18・21: 2黒下層, 3・5・10・17・20: 3黒層,

4・6・9・19: 3黒下層, 8・11・12・15: 島島表層

Photo.1 Examples of opal phytoliths isolated from study soils

1-2: Fan-shaped (*Oriza* type), 3: Fan-shaped (*Phragmites* type),

4: Fan-shaped (non-Bambusoideae type), 5: Fan-shaped (*Pleiblastus* type),

6: Fan-shaped (*Sasa* type), 7: Point-shaped (long type), 8: Elongate (barley/wheat husk type),

9: Elongate (straight type), 10: Elongate (ridge type), 11: Festucoid (double type),

12: Fragment of rice husk, 13: Chloridoid (*Phragmites* type), 14: Panicoid (frill type),

15: Fragment of *Oriza* leaf, 16: Orizoid, 17: Panicoid (typical), 18: Other short cell (tower type),

19: Bambusoid (*Pleiblastus* type), 20: Bambusoid (*Sasa* type), 21: Sedge husk

1・2・7: 2nd-black layer, 13・14・16・18・21: Under-2nd-black, 3・5・10・17・20: 3rd-black layer,

4・6・9・19: Under-3rd-black, 8・11・12・15: Top soil of dry cultivated field

も認められているものであり、稲作耕作の影響がより強く 2 黒層、2 黒直下層に反映されていることを示しているものといえよう。

ところで、2 黒直下層では、キビ型フリル付き珪酸体の検出率が総体的に高い。このことは、2 黒直下層において、キビ型フリル付き珪酸体の給源種の可能性があるヒエ属などの関わりが増加したと考えられる。

また、おしなべて、ヒゲシバ型ヨシ属タイプ、ファン型ヨシ属タイプが、比較的多く検出されるのは、当遺跡の湿性環境に対応するものであろう。湿性環境を好むカヤツリグサ科の種皮に起源する珪酸体が検出されること、また、乾性環境を好むタケ亜科に由来する珪酸体の検出率が、全般に高いことも、湿性環境と調和しているといえよう。なお、組成図には表示していないが、珪藻殻、海綿骨針が上位 3 層で検出されたことも、湿性環境を示している。

一方、島畠表層については、イネ属を含む非タケ亜科起源が珪酸体の主要給源であることでは上記水田土層と共通するが、イチゴツナギ亜科がより大きく関わっている点で異なる。ムギ類（イチゴツナギ亜科に帰属）タイプの棒状型珪酸体が検出されることは、ムギ類の栽培等を示唆している可能性があり、このことがウシノケグサ型の検出率が比較的高く、その中でダブルタイプのウシノケグサ型珪酸体やイチゴツナギ亜科タイプの珪化組織片が検出されたことに関係しているのかもしれない。また、イネ属タイプの機動細胞起源珪酸体、短細胞起源珪酸体に加えてイネ属タイプの珪化組織片が検出されたことも注目される。水田土層と島畠土層におけるイネに起源すると推定されるこれらの珪化粒子の組成の相違は、島畠の利用形態を示唆していると考えられるが、今後の検討課題である。

2) 根跡の X 線造影結果について

(1) 現代水田の根跡

写真 2, 3 は、現代水田 I の水稻根跡を、X 線立体造影法により撮影した影像である。写真の上辺が地表方向である。縦横に走る黒筋が、根跡である。倍率 2 倍程度の簡易実体鏡で観察頂きたい。左右の写真が 1 枚に合致して、奥行きのある立体像として観察できる。写真右上のスケール線の太さは 0.1mm、1 目盛が 1.0mm である。写真 3 以下についても、以上と同様の注釈で観察頂く。

次に、根跡観察のために、稲の根系形態の特徴を簡単に記す。稲の根系は水平から垂直まで、株元から 1 次根が多数、放射状に伸びる「ヒゲ根型」である。各 1 次根は直角に細い 2 次根を分岐する。1 次、2 次とも一本の根は凡そ直線的で、急な曲がりや屈折的な曲がりをしない。作土内では水平から、斜め下方および垂直下方まで全方向の根跡が発生するが、作土直下および下層土では垂直根跡が増える。作土では横走根跡、下層では縦走根跡が特徴になる。

さて、写真 2 には根跡の黒筋以外に面状（左側）や円状（中央下）その他の黒影が見える。これらを立体視すると、地表乾燥で発生した亀裂面（左側）や未分解有機物（前年の稲株碎片や施肥残体）など、作土特有の状況が観察される。因みに写真上辺の黒影帯は、試料土上面が造影剤を載せている

ため天井のように写った部分である。写真2の根跡には、水平や斜め下方に伸びる、作土特有の根跡がかなりの割合で存在している。但し、▲で1例を示した根跡のように、屈曲の著しいものは雑草など非稲根跡である。▲の付近には非稲根跡の細いものが数本見える。稲根跡を横と縦の方向に分けて数えと、各5本ずつ存在する。太さは直径1～0.5mm位で写真3の作土直下部に比べて太い。しかし、写真2は3に比べて、根跡本数が著しく少ない。

写真3を観察すると、作土から押し込まれた若干の混入物（写真中央の黒塊）が見えるが、直線的な稲の根跡が、濃密に縦走りしている。縦根跡の平均太さは、写真2よりも細く、根系の深度差を感じられる。この縦根跡から直角に水平方向に分岐する2次根の根跡は、太さが0.1mm級かそれ以下であるが、濃密な分布をしている。

僅か10cmほどの深度差で、このような根跡の分布密度の激しい差は何故生じたか。答は簡単明瞭で、普通移植栽培では必ず行う、耕起・代かき作業の影響である。写真2の根跡は、採土した4月から遡り、前年の秋収穫時点までの約半年間に、腐朽した根体を作るものに過ぎない。それも、4月末の耕起・代かきを迎えれば完全に消滅する。従って作土層では、根跡が発達したり蓄積されることがない。これに比べ、耕起・代かきの影響が及ばない作土直下、写真3では、この深度まで伸びた毎年の根体が、腐朽とともに根跡に変わり、根跡は崩されること無く保存される。永年の稲作により、根跡の蓄積は濃密なものとなる。

次に、現代水田Ⅱの写真4、5を観察する。写真4の作土では、やはり未分解有機物などの混入が塊状黒影になっているが、稲の根跡はやはり10本前後と少ない。殆ど水平方向に走っているのは、深度が5～10cmと浅いためである。不耕起栽培を永く続ければ、作土層にも根跡は蓄積されるはずであるが、1年くらいでは大した変化も現れていないことが、写真2と4の比較で解る。写真4には、前年まで続けられた普通移植栽培の影響が、強く残っていると見られる。

写真5の作土直下層では、対照的に濃密な稲の根跡の蓄積が鮮明である。写真3と比べて、濃密分布の点では好一対だが、写真5の方が根跡直径が幾分太いのは、稲の生育や品種の相違と思われる。

東北における2枚の沖積低地水田を選び、その作土と作土直下層の稲の根跡を見た。これらに共通の特徴は、耕起や代かきの影響が及ぶ作土では、根跡の残存が極めて疎になるが、その影響がない作土直下層では根跡の蓄積が極めて濃密になる。この疎密の対照が著しい点で、現代水田は共通しており、紙幅の都合で2例の例示に止めたが、普通移植栽培水田一般の特徴である。また、水田のみならず、普通耕起栽培の畑地でも、作土とその直下層の根跡密度は、水田と全く同じ対照性をもっている（TOKUNAGA, 1988）。

（2）1 黒層の根跡

池島地区に広がる水田跡の内、弥生時代後期の水田作土をなす1黒とその下層土を、図1の地点1の断面において、調査、採土した。その標本試料を、X線造影した一例が写真13である。黒筋以外

の黒影～薄黒影は、小面積の膜状亀裂である。この小亀裂は、立体観察すると根跡に絡んで発生しており、根跡から離れて、独立して発生した小亀裂は認められない。根跡が小亀裂との複合形態となり、また、存在するはずの2次根級の細根跡が、全く消失しているなど、造影写真がデータとしての価値を失っている。この断面1から採土した1黒下層の標本試料も、すべて写真13と同様のX線造影写真になった。

地点1の断面試料土の水分や密度を測定し、検討の結果、断面土層の水分乾燥が進行して、小亀裂が発生し、このように異常な根跡像が現れたという結論に達した。採土時、断面1には巾5～10mmの縦割れ大亀裂が1m以上の深さまで観察された。この断面はこの度の調査、採土の以前から、掘削され露出していた。そこで、今回は残念ながら、1黒水田の根跡研究は割愛する。

今後、他の遺跡の根跡を、X線立体造影法により研究する場合、土層の乾燥を避けるために、断面掘削直後に採土することを、重要な注意事項として教訓にしたい。また、粘質土の乾燥収縮が、根跡（根成孔隙）に絡みつつ、微小亀裂群の発生として進行することは、土壌物理学的にも知られていない現象であり、貴重な資料として写真13に掲げた。

（3）2黒水田、3黒水田の根跡

前述のように、2黒層、3黒層および島畠では、掘削による断面露出に合わせて調査、採土を同時に行った。そのため乾燥による根跡形態の攪乱はなく、正常にX線造影が進行した。同一層位から6個ずつの標本試料が得られており、3個以上撮影した影像の内、共通の特徴をもち、しかも広く鮮明に根跡を観察できるものを写真6～12に示した。これらの内、2黒水田、3黒水田に関わる写真6～10の5枚について、先に検討する。

①遺跡地層の根跡保存性

この5枚の写真を通して、最初に指摘できることは、2,100～2,200年前の水田土層にも、根跡が精細に保存されていることである。しかも、現代水田の稲根跡（写真2～5）と形態が類似した根跡を5枚の写真の何れにも見出すことができる。勿論、現代水田と異なり、稲根跡にしては太すぎるものや、稲とは形態の異なる根跡などが、混じっている写真もある。しかし、総体として類似性は濃厚で、根跡自体の保存性も良好と言える。

冒頭に記した、自然地層における根成孔隙の耐久年代と同様に、遺跡地層における各種根跡も、その耐久性はきわめて大きいことを、これらの写真は示している。ただし、遺跡地層の保存が、前述したように乾燥したり、掘削したり、各種の攪乱を与えないことが保存の前提条件になる。

また、根跡保存の精細性から考え、今後研究が進めば、根跡の形態から古植生の同定も可能性がある。

②2黒水田の根跡

まず、写真6の根跡は最も太いものが径1mm強である。現代水田では1mm程であるから、や

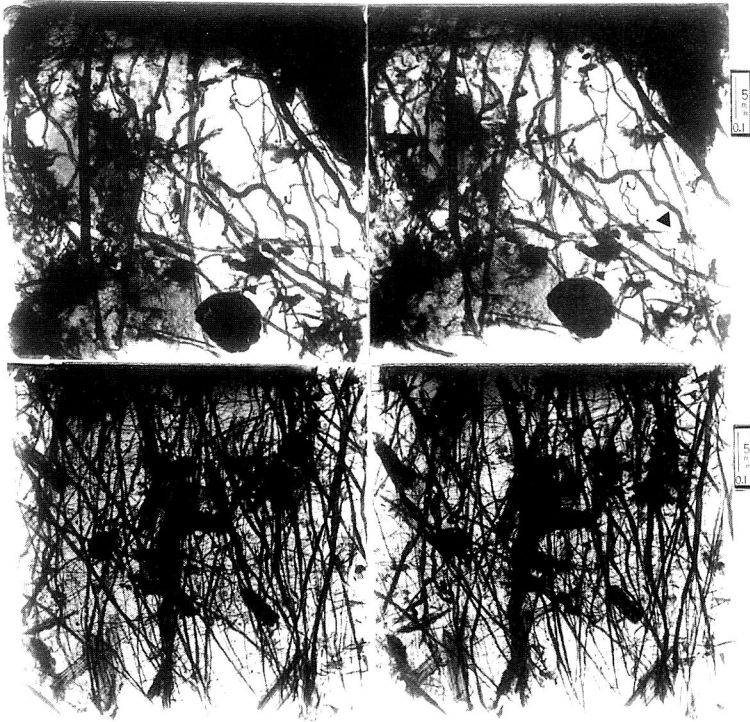


写真2 現代水田Ⅰ
作土
深さ (10-15cm)
Photo. 2
Present paddy I
Plow-layer
Depth (10-15cm)

写真3 現代水田Ⅰ
作土直下
深さ (20-25cm)
Photo. 3
Present paddy I
Under-plow-layer
Depth (20-25cm)

写真4 現代水田Ⅱ
作土
深さ (5-10cm)
Photo. 4
Present paddy II
Plow-layer
Depth (5-10cm)

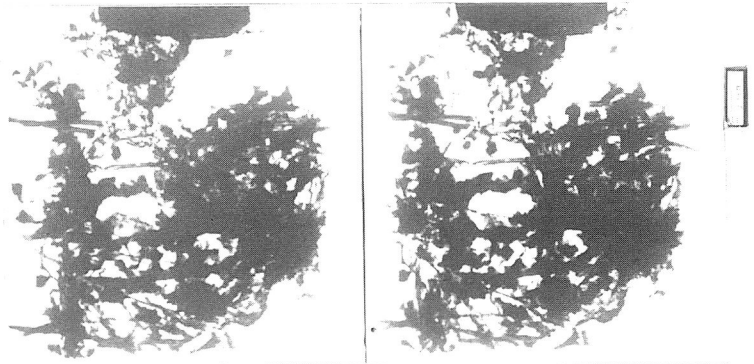


写真5 現代水田Ⅱ
作土直下
深さ (15-20cm)
Photo. 5
Present paddy II
Under-plow-layer
Depth (15-20cm)

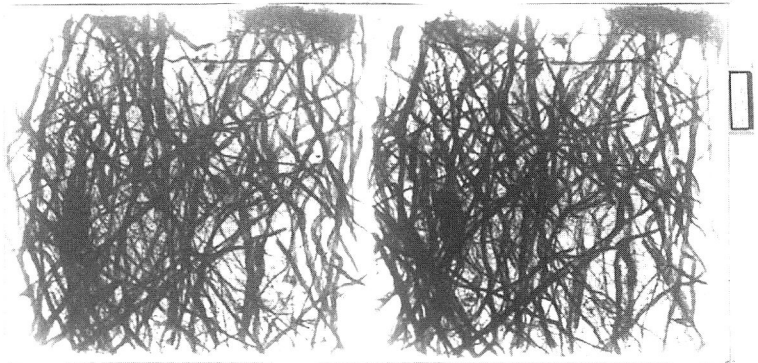


写真2～5 現代水田の稲根跡 (X線立体像)

Potos.2-5 Traces of rice roots growth in the present paddy (X-ray stereographs)



写真6 2黒
作土
深さ(0-6cm)
NO 6 採土
[太+]

Photo. 6
2 nd-black layer
Plow-layer
Depth (0-6cm)
NO 6 sample

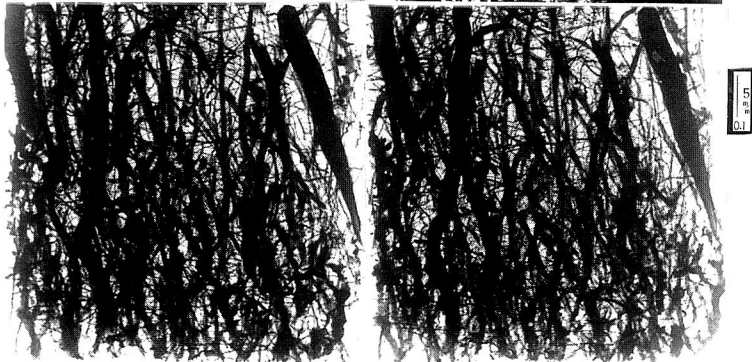


写真7 2黒直下
作土直下
深さ(6-12cm)
NO 7 採土
[縦太細++]

Photo. 7
Under- 2 nd-black
Under-plow-layer
Depth (6-12cm)
NO 7 sample

写真8 3黒
作土
深さ(0-6cm)
NO 8 採土
[縦+]

Photo. 8
3 rd-black layer
Plow-layer
Depth (0-6cm)
NO 8 sample



写真9 3黒直下
作土直下
深さ(0-6cm)
NO 4 採土
[++]

Photo. 9
Under- 3 rd-black
Under-plow-layer
Depth (0-6cm)
NO 4 sample



写真6~10 当遺跡の弥生中期水田の稲根跡(X線立体像)

Potos.6-10 Traces of rice roots growth in the middle Yayoi period paddy at this site (X-ray stereographs)

写真10 3黒下方
心 土
深さ (16-22cm)
NO 5 採土
[+]

Photo. 10
Under-3 rd-black
Subsoil
Depth (16-22cm)
NO 5 sample

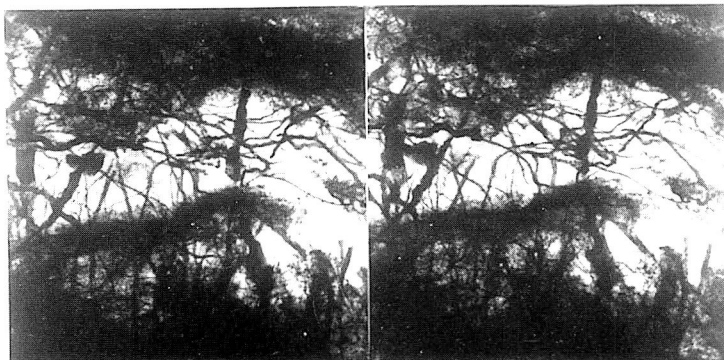
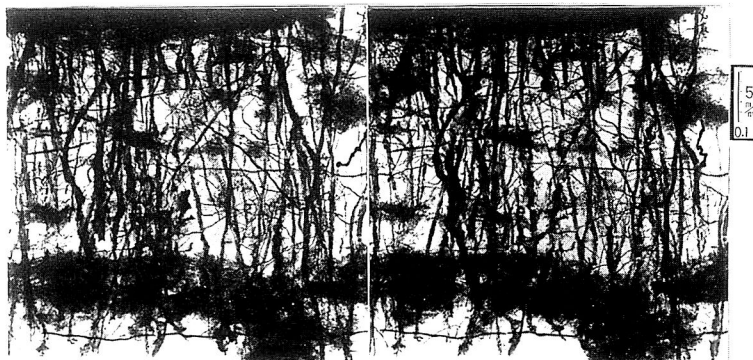


写真11 島島表層
作 土
深さ (0-6cm)
NO 9 採土
[太曲++]

Photo. 11
Topsoil of dry culti-
vated field
Depth (0-6cm)
NO 9 sample

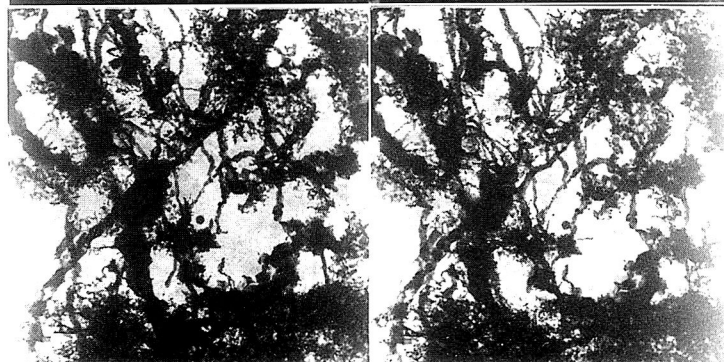


写真12 島島表層直下
作土直下
深さ (6-12cm)
NO 10 採土
[斜太曲++]

Photo. 12
Under-topsoil of dry
cultivated field
Depth (6-12cm)
NO 10 sample

写真13 1黒
作 土
深さ (0-6cm)
NO 1 採土

Photo. 13
1 st-black layer
Plow-layer
Depth (0-6cm)
NO 1 sample



写真11, 12 当遺跡の15世紀島島の作物根跡(X線立体像)

Potos.11, 12 Traces of crop roots growth in the 15th century dry cultivated field at this site
(X-ray stereographs)

や太めであるが、直線的形状などから見て、太いものも含め全体は稲根跡と認められる。写真7では、右上に太さ2 mm級の、稲根跡としては太すぎるものが1本見られる。この他にも1.5 mm程の太い根跡が左側に2本見られる。これらを除いて観察すれば、大部分の根跡が稲の縦根跡と見られる。

さて、現代水田では、作土と作土直下の根跡の分布密度が、疎密の差が著しい対照を示していた。この対照性が2黒水田ではどうであろうか。写真6, 7を比べると、作土(2黒)の方が直下層に比べて根跡密度が低いことが見て取れる。写真6の中で、径1 mm級の1次根だけで直下層と比べれば、根跡密度の差は歴然とする。しかし、現代水田に比べれば、2黒作土の根跡は密である。とくに細いものが多い。これは何故か。2黒水田の上部には、1黒水田など後代の堆積があり、それらの上位層における後代の栽培や、自然植生などの根群が下方に伸び、2黒層に侵入する。上方から下方に伸びて、細くなって2黒作土に侵入した根跡群を、分別することは困難だが、そのような根群が写真6に含まれていることは否定できない。上位層からの根跡増加の影響は、2黒直下層にも加わっているが、2黒の厚さ分だけ、影響は少ないであろう。これらの上位層の影響を差引いて考えると、2黒と2黒直下の根跡密度の差は一層大になるはずであり、現代水田の対照性に近づく。

このように観察してみると、2黒水田時代には、作土にかなりの攪乱作用が、毎年加えられていたと考えねばならない。それが、現代水田に類する耕起・代かきであるかどうか、断定は控えるが、写真6, 7は、その可能性を示している重要な資料と思われる。水田の耕作で、耕起・代かきに代わる毎年の作土攪乱作用を、他に考えることはかなり困難だからである。弥生時代稲作で代かき、移植栽培が検証されているのは、現時点では弥生時代の後期以降(工楽, 1995)であり、2黒水田時代に代かき・移植栽培が行われていたとすると、従来の知見を数世紀以上早める修正となる。

当遺跡における2黒水田時代には、自然地形の人為的改変を含む大規模な水田造成が行われ、水路もまた開削され、灌漑排水網がブロックやユニットを超える全域的なものに拡大された。この状況は、自然地形に従って適地のみを水田化し、ユニット以下の小規模分散型灌漑排水網であった3黒水田時代に比べ、2黒水田時代は水田開発技術上の発展を示す画期とされている(岡本, 2002)。このような時代背景を考えると、2黒水田時代における開発への努力が、代かき・移植などの栽培法にも向けられていた可能性が十分に想定される。

また前節のOP分析の結果、2黒試料土中の『イネ属タイプファン型+短細胞起源イネ型』(以下、イネ属タイプ珪酸体と呼ぶ)の検出率は6.7%、2黒直下が4.2%に対し、次に述べる3黒では1.8%、3黒直下0.4%であり(図4から算出)、約100年を経て2黒水田時代にはイネ属タイプ珪酸体が3.7倍に増大したことを示すデータが得られている。珪酸体検出率の増大原因としては、水田の単位面積当たり生産力の増大が考え易い。したがって、雑草に打勝つ代かき・移植栽培法の導入あるいはその進展が、OP分析結果からも支持されたと考えたい。

③ 3黒水田の根跡

写真8の3黒には逆Y字型の太さ2.5 mm程の非稲根跡が見える。水稻根はこのような鋭角分岐

をしない。これを除くと太さは1 mm 前後からそれ以下となり、直線的形態の根跡であり、稲根跡に見える。しかし、上述のようにイネ属タイプ珪酸体は1.8%と僅少であるから、根跡の多くは非水稻のイネ科作物と考えられる。また、水田表層としては横走、斜走する1次根（径1 mm 級）の根跡が殆ど見られないことも、2黒作土層と対照的である。

写真9は総て太さが1 mm 級であり、直線的形態で、濃密な根跡分布は、現代水田の作土直下層を思わせる。しかし、上述のようにイネ属タイプ珪酸体は0.4%と、殆ど検出されなかった層位である。ただし、3黒層の僅かな稲の根が、この層位に侵入しているはずである。基本的には3黒層の作物と同種の根跡と考えられる。稲およびイネ科作物の根跡と見られる。

写真10は更に下方の根跡で、太さは一段と細くなり、0.5mm 級以下が殆どで、写真8からの連続性を感じられる。写真10の上辺と下辺にある帯状黒影と、上半部に点在する黒雲斑は、立体視すると砂層や小砂塊であることが解る（砂粒子間の粗間隙に造影剤が浸入し、黒影化する）。

さて、3黒水田として、作土と直下層の根跡密度の対照性はどうであろうか。写真8と9の密度差は径1 mm 級の根跡で比べると、2黒水田の場合ほど激しくない。よく観ると、3黒作土のほうが直下層より若干疎であるが、その差は顕著でない。その原因を考察する。

まず、第1の考察として、3黒水田時代には、耕起・代かきのような強い攪乱を与えない栽培法が行われたと推察される。上述したOP分析結果からして、各種穀類に混じって稲はそれらの一部として栽培されていたと考えられる。当遺跡の立地に関する前節のOP分析結果では、湿性環境であったことが明らかにされているが、自然湿地のような当地に、不耕起に近い直播栽培が行われていたため、作土でありながら、写真8のように密な根跡が蓄積されたと考えられる。

第2の考察として、写真8の3黒試料は断面3からの採土NO8であり、直上のNO7やNO6とは12~18cm 以内の近さのため、2黒や2黒直下層の植生根の強い影響が及んで、それら後代の根跡が重なり、3黒層では比較的密な根跡分布になったと解釈することができる。この理解に立つと3黒時代に限定した、3黒層内の根跡は、3黒直下層に比べて、かなり疎らな分布になると考えなければならない。その疎分布をもたらす農耕手法への推定は、やはり「代かき」を想定することになる。前述のように、3黒水田時代の水田開発技術は未熟であったが、全国的に見れば、この時代には、既に東北地方の北辺まで、水田農耕が普及していた時期である。大陸伝来の稲作法には、当初から代かき・移植栽培が組込まれていた可能性も、十分に考えられる。3黒水田時代には、既に「代かき」が行われていたとしても、おかしくない。

第1と第2の考察の何れが妥当であるか？ 本報告で結論を出す段階ではない。3黒層の上位至近に2黒層など、後代水田の重なりがない地点を探せば、その3黒層の根跡造影により、秘められた証拠を明かす可能性がある。今後の課題である。

(4) 島 畠

島畠は砂含量が高く、供試土が4 cm 立方の形で自立できるか、自壊して崩れるか危惧された。しかし、撮影法が試料土の外周を粘土の薄層によりコーティングするので、心配は不要となった。けれども、写真 11, 12 に示すとおり、砂質土の特徴である粗間隙が黒雲状に造影されて、そこに重なった根跡像が見えなくなる。写真 11 の上下の黒影、写真 12 の下端の黒影がそれである。また、写真 12 では特大の砂粒間隙が粒状（径 0.3mm 前後）になって、根跡像の周辺につぶつぶに現れている。

しかし、写真 11, 12 の程度には、砂土であっても根跡像を得ることができた。この根跡像から作物種を同定したいが、研究はまだその段階に達していない。前述した OP 分析では、ムギ類の栽培等の可能性も示された。麦の根跡は稲に類似するが、写真 11 はその可能性を否定するものではない。また、棉類など従来から考えられてきた作物も否定できない。この写真 2 枚から判明することは、2 黒, 3 黒などに比べて根跡密度が極めて小さいことである。15 世紀(室町時代)の畠面であるから、弥生時代に比べれば、耕起作業もかなり頻繁に行われ、そのため根跡密度が低くなっていると考えられる。とは言え、現代の畠の作土では、根跡は皆無に近いので、現代から見れば粗放耕作に属することになる。

(5) 土層断面の「縦根跡記載」と X 線造影写真の比較

図-2 の縦根跡に関する記載を、その層位の X 線写真（写真 6～12）の見出しの最後に転記し、[+印]で表した。因みに、断面記載は常に採土時に行われており、X 線撮影より先行して現地で土層を観察しながら、根跡評価を行っていることは言うまでも無い。

この現地評価を、写真の根跡状況と対比してみる。まず水田では、写真 6～10 の 5 枚の写真の相互比較で考えると、写真 7, 9 の 2 枚の根跡密度が、他の 3 枚に比べて濃密である。現地判定でも、この 2 枚を 2+ と評価し、他の 3 枚が 1+ に評価されていることは、写真の実体に良く合致しているといえる。ただ、写真 6 と 8 が同列の 1+ になることは若干問題であるが、現地判定の記載に、そこまで精度を求めることは無理であろう。また、写真 7 について「縦太細」、写真 8 について「縦」などという形態記載も写真と凡そ一致している。全体として、水田の縦根跡記載は、正確な方法といえる。

次に、島畠では、根跡密度の 2+ 評価と写真 11, 12 の実体とは乖離した。前述したように、写真の根跡は疎である。この不一致は何故生じたのか。その原因として、次のことが考えられた。島畠の断面には、斑鉄が殆ど無数、濃密に現れていた。砂土が持つ粒子同士が作る無数の粗間隙に発生する斑鉄と根跡内に発生する斑鉄の区別が、1 平面である垂直断面上では極めて困難である。このことが、影響したと考えられた。しかし、根跡の形態記載では、「斜太曲」の観察は、写真とかなり良い合致を示している。

以上のことから、粗砂含量の高い砂土では、根跡密度の評価が困難であったが、それ以外の点では、

加藤の根跡記載法は極めて有効と判断された。

5. まとめ

池島・福万寺遺跡の池島地区弥生時代水田および同地区の15世紀島畠について、その作土層や作土下方層の不攪乱採土を行い、水田土層に残る稲の根跡をX線立体造影法により分析を行った。併せて植物珪酸体分析を行い、X線による分析の一助とした。調査した水田土層は弥生時代中期中葉(2,100年前)の2黒層とその直下層、また同時代前期末～中期初頭(2,200年前)の3黒層とその直下層であった。

その結果、次のような知見を得た。

- 1) X線による稲根跡の分析結果では、現代水田との比較から、2黒水田時代には代かき・移植栽培法が行われていた可能性の高いことが示された。このことは3黒に比べ、2黒にはイネ属タイプ珪酸体の検出率が3.7倍に増加していることと、対応すると考えられた。
- 2) 3黒水田については、2黒水田土層が直上に重なったため、両水田時代の根跡が3黒層の中に累積し、明確な結論を得られなかった。今後、直上に2黒水田が存在しない3黒層を探せば、結論を出し得ると考えられた。
- 3) 当遺跡の弥生時代水田土層には、水稻その他の植物根跡が極めて精細、良好に保存されていた。このことから、根跡のX線造影法は、今後植物生産遺跡における栽培種同定などにも発展させることを示唆していると言えよう。
- 4) 土層に残る根跡は、土層の乾燥により、変形、消失していた。このことは、1黒層の実験により明らかとなった。根跡のX線造影を行う場合には、断面掘り出し時に、同時に採土する必要がある。
- 5) 加藤の縦根跡記載法による評価は、X線造影写真と良好な一致を見た。

謝 辞

本研究に際し、(財)大阪府文化財センター池島分室の調査員の方々には、発掘現場における調査にあたり、文献収集から採土まで、種々の面でお世話頂いた。(独法)奈良文化財研究所の松井章氏、宮路淳子氏には土壌採取にあたりご協力頂いた。また、本論文に配した諸図面の仕上製図は、弘前大学農学生命科学部 田村美代子事務官にお願いした。

本研究の一部は、科学研究費補助金、基盤研究B(1)「X線立体造影法による土壌間隙研究の新展開」(課題番号、12460103。代表、佐々木長市)の補助を受けて行われた。以上、記して各位に感謝いたします。

参考文献

- 井上智博, 畑暢子, 辻本裕也, 辻康男, 外山秀一, (株)古環境研究所, 中野益男, 中野寛子, 長田正宏, 井上巖, 大澤正己, 廣瀬時習 (2002) 池島・福万寺遺跡 2 分析・考察編, (財)大阪府文化財センター, p550.
- 岡本茂史 (2002) 池島・福万寺遺跡発掘調査概要 X X VI, pp162~169.
- 加藤芳朗 (1992) 遺跡発掘現場における埋没水田認定に関する土壌学的問題, ペドロジスト, 36 巻, pp167~174.
- 工楽善通 (1995) 水田の考古学, 東京大学出版会, pp107~112.
- 外山秀一 (1998) 池島・福万寺遺跡の立地と環境 III—95—2 調査区のプラントオパール分析の結果その 1—, 池島・福万寺遺跡発掘調査概要 X X, pp108~130.
- 徳永光一, 侯彦林, 馬場秀和, 佐瀬隆 (1997) 中国・藍田の黄土層における根成孔隙の発達について, 農業土木学会論文集, NO187, pp59~68.
- 徳永光一 (1999) 「土壌間隙の X 線立体造影法」と「根成孔隙」について, 水田跡, 畑跡をめぐる自然科学—その検証と栽培植物, 第 9 回東日本の水田跡を考える会, pp16~21.
- 徳永光一 (1995) 土壌間隙の X 線立体造影法, 畑地農業振興会, p246.
- 日本ペドロロジー学会編 (1997) 土壌調査ハンドブック改訂版, 博友社, pp88~90.
- K. TOKUNAGA (1988) X-ray stereoradiographs using new contrast media on soil macropores, Soil Science, 146(3), pp199~207.

(2003 年 8 月 24 日受付, 2003 年 11 月 6 日受理)

A study on the traces of rice root growth remaining in the Yayoi period paddy soils

— An application of the X-ray stereo-imaging method to Ikejima-Fukumanji site paddy —

Koh-ichi TOKUNAGA¹⁾, Choichi SASAKI²⁾, Koichi SATO³⁾, Takashi SASE⁴⁾,
Yoshiro KATO⁵⁾, Yoshiyuki KURAKU⁶⁾ and Tomohiro INOUE⁷⁾

1) Emeritus Professor, Iwate University, 1-39-16 Hakoshimizu,
Morioka-shi, Iwate 020-0116, Japan

2) Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University,
3 Bunkyo-cho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8561, Japan

3) School of Veterinary Medicine & Animal Sciences, Kitasato University,
35- 1 Higashi 23, Towada-shi, Aomori 034-8628, Japan

4) Miyako Senior High School, 2 - 1 - 1 Miya-machi, Miyako-shi, Iwate 027-0052, Japan

5) Emeritus Professor, Shizuoka University, 53- 4 Kohnodai,
Iwata-shi, Shizuoka 438-0077, Japan

6) Osaka Prefectural Sayamaike Museum, 2 -chome Ikejiri-naka,
Osakasayama-shi, Osaka 589-0007, Japan

7) Osaka Center for Cultural Heritage, 1 - 1 -15 Horimizo,
Neyagawa-shi, Osaka 572-0814, Japan

In the Ikejima site, the plow-layer soils and under-plow-layer soils of a Yayoi period paddy or dry cultivated field were sampled without disturbing them. Traces of rice root growth remaining in paddy soils were found and analyzed by means of a new X-ray imaging method using a contrast medium and stereography. With this new method, opal phytolith analysis on these soil samples was conducted to support X-ray investigation.

The investigated paddy soil layer were the 2 nd-black layer, the 3 rd-black layer and their under-layers. The 2 nd-black layer belongs to the mid of middle Yayoi period (2,100 yrs. B. P.) and the 3 rd-black layer belongs to the final of early Yayoi ~ the beginning of middle Yayoi period (2,200 yrs. B. P.).

The results of the study were as follows.

1) Evidence indicating a high probability of puddling and rice transplanting practice in the

2 nd-black paddy was recognized. This result was obtained from comparisons of traces of rice root growth remaining in the 2 nd-black paddy with those in the present paddies. This result reveals that the beginning of puddling and rice transplanting practice dates back to 2 or 3 centuries earlier than previously shown.

2) The traces of rice root growth remaining in the 3 rd-black layer have been disturbed by the 2 nd-black layer. This is because the 2 nd-black layer overlies on the 3 rd-black at an interval of only 6 cm. Because of this, a clear conclusion on the 3 rd-black paddy was not gained.

3) In the Yayoi period paddy of this site, the traces of rice and other plants root growth have been preserved in a fine state. The valuable applications of the new X-ray imaging method in archaeological analysis are anticipated in the future.

4) In the dry soil layer, traces of root growth have been transformed and disappeared. The 1 st-black layer was in this state. Therefore, the X-ray imaging method for traces of root growth should be applied in non-dry soil conditions.

5) The estimations obtained by Kato's survey method on the traces of root growth corresponded well with X-ray imaging graphs.

Notice to observation on the X-ray stereographs The graphs were shot by using contrast medium and X-ray stereography. Please use a pocket-stereoscope having about 2 magnifications to observe graphs. The objects of shooting were 40 mm cube soil samples. Six samples were taken from one sampling block soil. Detailed scale is shown on the right hand of graph. Upper side of graphs are the direction of ground surface. Black lines or black portions in graphs are void imaged by infiltrated contrast medium. Black lines show traces of rice (or other crops) roots growth.

2 nd-black layer was the plow-layer about 2,100 years ago and 3 rd-black layer was the plow-layer about 2,200 years ago.